

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geotechnologie



David Hanák

Seismická odezva staveb

Seismic response of constructions

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc.

Praha, 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 10. 8. 2015

.....

David Hanák

ABSTRAKT

Zemětřesení jsou jedním z nejničivějších přírodních jevů. Mají potenciál způsobit rozsáhlé škody na majetku a životech. Tato práce má za cíl přiblížit chování budov během zemětřesení a jejich odezvu na něj. Začátek je věnován popisu zemětřesení, jeho vzniku a vlastnostem seismických vln. Dále se proberou vlastnosti budov důležité pro stanovení odezvy budovy a několik obecných doporučení pro navrhování seizmicky odolných staveb. Poslední část se věnuje stanovení spekter odezvy budovy a vlastních frekvencí.

ABSTRACT

Earthquakes are one of the most devastating natural events. They have the potential to inflict extensive damage to property and lives. This work aims to approximate the behavior of buildings during earthquakes and their response to it. Beginning is devoted to describing the earthquake, its origins and the characteristics of seismic waves. Further will be discussed building characteristics important for estimating the response of the building and several general recommendations for the design of seismically resistant structures. The last part is dedicated to the determination of response spectra buildings and natural frequencies.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu práce, Doc. RNDr. Tomáši Fischerovi, Ph.D. za jeho podnětné připomínky, poskytnutí podkladů a velkou trpělivost

Obsah:

1.	Úvod	7
2.	Seismické vlny	8
2.1	Zemětřesení – registrace	11
2.2	Zdroje zemětřesení	12
2.3	Mechanismy zemětřesení	13
2.4	Přípovrchové efekty	14
3.	Zemětřesení – projevy na stavby	15
3.1	Vliv tvaru a konstrukce budov	16
4.	Odezva budov	18
4.1	Síly a zrychlení	18
4.2	Otřesy	20
4.3	Vlastní frekvence	21
4.4	Spektrum odezvy	23
4.5	Spektrum odezvy země	25
5.	Shrnutí a závěr	27
6.	Citace a odkazy	28

1. ÚVOD

Zemětřesení bezesporu patří k nejničivějším přírodním katastrofám. Bývá definováno jako „náhlý pohyb nebo chvění země, vyvolané prudkým uvolněním pomalu nahromaděného napětí“. Při tom se uvolní obrovské množství energie - například stupeň 5 Richterovy škály bývá srovnáván s výbuchem první atomové bomby o síle 12 kilotun TNT (Petránek, 1993; Stein a Wysession, 2003).

Díky jejich nepřehlédnutelným projevům jsou o zemětřeseních vedeny záznamy již z dob starověkých civilizací (zejména pak z oblasti Mediteránu - Řecko, Itálie, Kréta a Sýrie). V některých případech dokonce určily další vývoj těchto civilizací: buď přímo – přetvořením povrchu krajiny, či nepřímou – změnou mocenskopolitických vztahů. Jako příklad můžeme uvést zemětřesení ve Spartě z roku 464 př. n. l., které vedlo k povstání otroků a vyústilo v první Peloponéskou válku (Thukydides, 431 B. C.). Nicméně k pochopení samotných principů vzniku a šíření zemětřesení dochází až mnohem později - v období rozvoje vědy v 17. století přichází Huygens, Galileo, Hook, Newton a další badatelé, kteří umožní vznik teorie popisující chování materiálů a šíření vln v prostoru. V roce 1875 je potom sestaven první seismoskop schopný jevy i zaznamenávat (Shearer, 2009).

Celkový koncept zemětřesení není nikterak složitý. Seismické vlny jsou generovány ve zdroji (ať už přírodním nebo uměle vytvořeném) a dále se šíří skrze médium (půda, hornina, voda, atd.), až k zemskému povrchu, kde jej může zaznamenat senzor měřicího přístroje. Tento přístroj nazýváme seismometr, výstup z něj (čili zaznamenané otřesy) se pak nazývá seismogram. Z něj můžeme získat jistou informaci o zdroji seismického vlnění a médiu, kterým vlnění prošlo (Stein a Wysession, 2003). V našem případě za toto médium můžeme považovat i stavební materiál budov, a pokusit se zjistit, zda například budova není nějak poškozena. Poškození budovy zemětřesením závisí na jejích elastických parametrech a velikosti kmitů. Stěžejní roli v tomto hraje parametr budovy nazývaný vlastní frekvence. Dále si jej detailněji rozebereme.

Skutečné poškození budovy nastává díky několika různým příčinám. V případě povrchových otřesů je poškození důsledkem samotných otřesů, nebo poklesu půdy pod budovou na nižší úroveň než byla před zemětřesením. To se nazývá subsidence. Takováto dynamická odezva budovy na pohyby země je nejdůležitější příčinou poškození budov zemětřesením. Vznik trhliny přímo pod budovou a následně propadnutí se kamsi do hlubin

je obraz, který bývá často zobrazován ve filmech – nicméně ve skutečnosti je toto velmi zřídka (zdali vůbec) pozorovaný jev. Dalšími možnými riziky jsou ztekucení půdy pod budovou nebo jevy provázející rozsáhlá zemětřesení (například požáry, záplavy či tsunami).

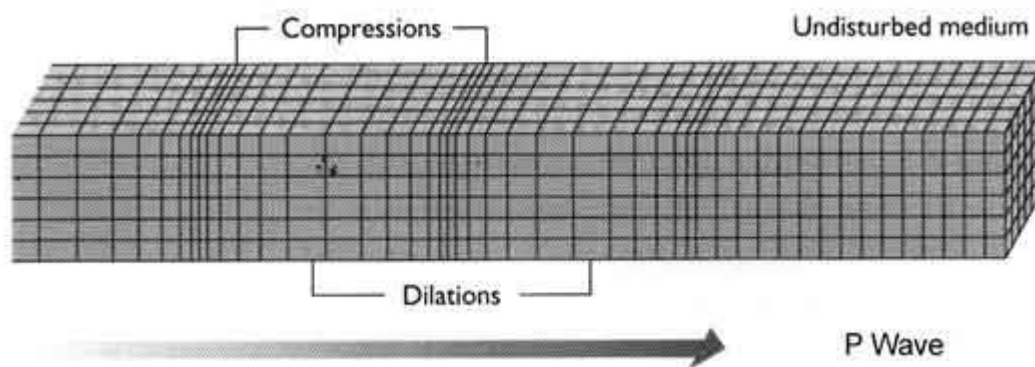
Obecně však zůstává v platnosti rčení, že největším rizikem pro člověka je nekvalitně postavená budova. Z tohoto důvodu je velmi důležité detailně pochopit chování budov během zemětřesení, protože teprve až pak lze navrhnout skutečně účinnou ochranu budov (Stein a Wysession, 2003).

2. SEISMICKÉ VLNY

Seismické vlny, jak je popisuje Novotný (1999), vznikají v hypocentru (ohnisku) zemětřesení. Pokud si představíme ohnisko v kontinuu, vlny se z něj budou rovnoměrně šířit všemi směry – a v případě izotropního a homogenního prostředí dokonce i stejně rychle. Přitom energie přenášená vlnami je rozprostírána ve stále větším prostoru. To nazýváme geometrický rozptyl. Vlny se budou šířit, až dokud nenarazí na překážku (jako je například hranice prostředí s jinými vlastnostmi). V takovém případě dojde k zajímavým jevům: vlny se začnou odrážet a lámat podle Snellova zákona. To může vést i k tomu, že zdánlivě zaznamenáme několik vln, avšak jde pouze o jedinou vlnu a její odrazy.

Můžeme se setkat s celkem 4 druhy vln. Podélné, příčné, Rayleighovy a Loveho vlny. Podélné a příčné označujeme jako *objemové* vlny, Rayleighovy a Loveho potom jako *povrchové*. Je však nutno dodat, že povrchové vlny jsou pouze speciální případ interference P a S vln. V užším smyslu slova se proto nejedná o nový druh vln. Nyní si tyto 4 typy postupně rozebereme.

Podélné vlny, také nazývané kompresní, primární, nebo jen jako P-vlny. Jsou to první vlny, které se objevují na seismogramu. Kmitající částice se pohybuje kolem své rovnovážné polohy ve směru šíření vlny (proto název *podélné*). Při průchodu způsobují zhušťování a ředění materiálu (viz obrázek 1). Do této kategorie spadají vlny zvukové. Rychlost šíření P-vlny se značí jako v_p .



Obrázek 1: znázornění šíření P-vln prostředím a objemové změny při průchodu vlny.

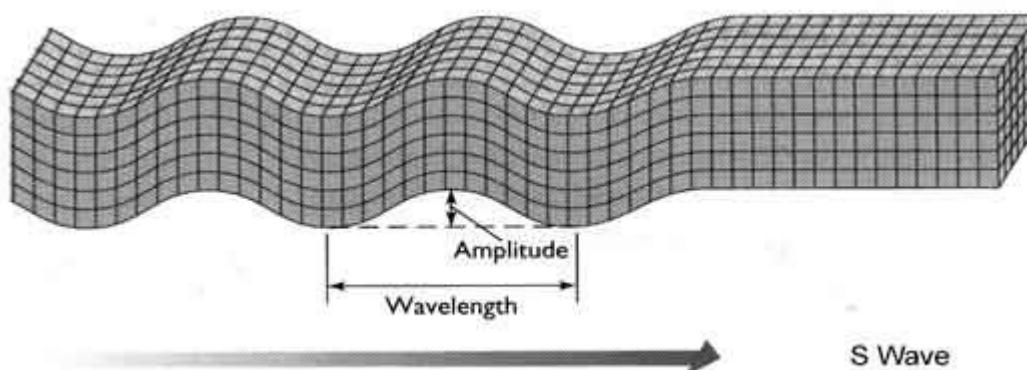
Přejato z <http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm>

Příčné vlny, také nazývané střížné, S-vlny, sekundární, nebo rotační. Procházející vlny způsobují rotaci a smyk v materiálu, zatímco nedochází k žádným objemovým změnám. Pohyb částice kolem rovnovážné polohy je kolmý ke směru šíření vlny (viz obrázek 2). Rychlost šíření S-vlny se značí jako v_s .

Rychlosti šíření P a S vln v_p a v_s jsou podřízeny vlastnostem materiálu (konkrétně Laméovým konstantám λ a μ , a hustotě materiálu ρ). Potom jde vyjádřit rychlosti jako:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{a} \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

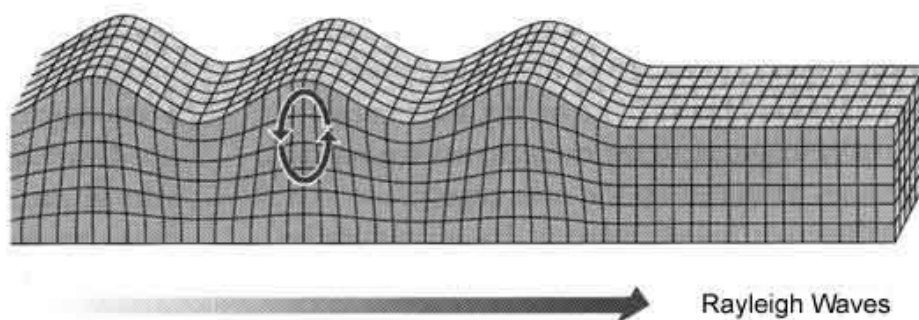
V kapalinách je konstanta μ rovna 0, a proto se kapalinami S-vlny šířit nemohou.



Obrázek 2: znázornění šíření S-vln prostředím a kmitání kolmo ke směru šíření. Přejato z

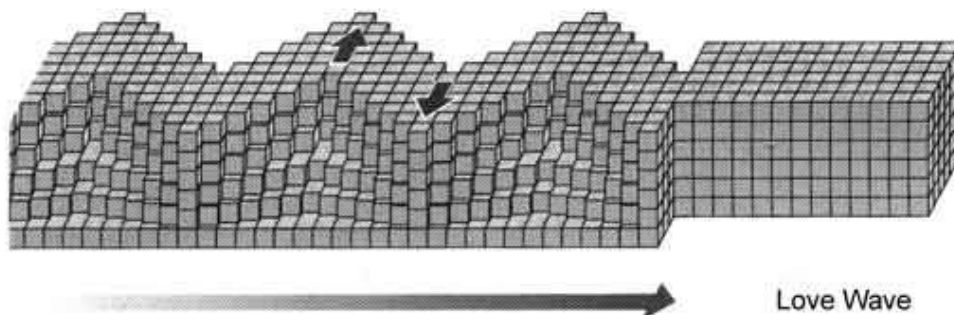
<http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm>

Rayleighovy vlny. Máme-li kontinuum ve formě poloprostoru stýkajícího se s jiným prostředím, vyskytují se pouze u povrchu vlny kombinující vlastnosti P a S vln. Rayleighovy vlny jsou elipticky polarizované v rovině určené normálou k povrchu a směrem šíření vlny. Každý bod tedy koná pohyb po elipse. U povrchu má pohyb retrográdní směr (tzn.: při pohybu vlny doprava bude rotace probíhat v kladném směru otáčení). Směrem do hloubky se elipsy zmenšují. Rychlost šíření Rayleighových vln je o něco nižší než rychlost v_s (podle empirického vzorce to je $0,9 v_s$).



Obrázek 3: znázornění šíření Rayleighových vln prostředím a kmitání bodů po eliptických drahách. Přejato z <http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm>

Loveho vlny. Příčně kmitající vlna se šíří rovnoběžně s povrchem. Na rozdíl od Rayleighových vln však Loveho vlny nemohou vznikat v homogenním poloprostoru. Jejich vznik je podmíněn narůstající rychlostí v_s s hloubkou.



Obrázek 4: znázornění šíření Loveho vln prostředím a kmitání kolmo ke směru šíření. Přejato z <http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm>

2.1 Zemětřesení - registrace

Záznam seismických vln provádí seismograf. Přístroj kromě samotného senzoru obsahuje také rozmanité součásti na zesílení signálu, převod na digitální data a mnoho dalších. Hlavní parametry senzoru jsou: frekvenční odezva, citlivost a dynamický rozsah. Citlivost vyjadřuje velikost nejmenšího možného pohybu země, který lze ještě zaznamenat. Poměr mezi největší a nejmenší amplitudou, kterou jsme schopni správně zaznamenávat, se nazývá dynamický rozsah (jednotkou jsou dB). Typická hodnota dnešních senzorů je přibližně v rozmezí 120-140 dB, avšak tento parametr je frekvenčně závislý (Havskov a Alguacil, 2002). Je potřeba, aby přístroj byl schopný zaznamenávat přirozenou hladinu zemského šumu, protože jinak bychom nemuseli zaznamenat jevy v celém jejich rozsahu (Shearer, 2009).

Základním principem seismometru je měření pohybu (resp. zrychlení) setrvačné hmoty uvnitř senzoru vůči zemi. Pro vytvoření měřitelného elektrického signálu se využívá indukčního jevu při pohybu cívky v poli magnetu. Měření probíhá pouze v jedné ose, kterou si uživatel sám volí nasměrováním senzoru. Existují i senzory, které měří ve 3 kolmých osách naráz, je to však pouze konstrukční řešení kombinující 3 výše popsané 1-složkové senzory (nazývá se 3-složkovým senzorem).

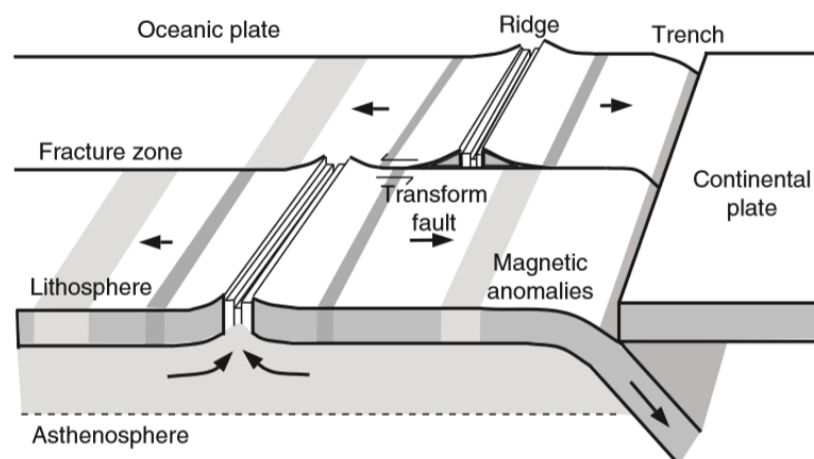
Protože k lokalizaci zemětřesení nestačí pouze údaje z jednoho místa, vyvstala potřeba sdílet údaje z různých měřících stanic co nejrychleji s centrem pro zpracování. V 60. letech se proto objevuje první síť (WWSSN), záhy následována dalšími. V dnešní době je provozována celá řada sítí, mnohdy propojených navzájem. Podle rozsáhlosti monitorovaného území je můžeme dělit na globální (např. GSN), regionální a lokální (Stein a Wysession, 2003).



Obrázek 5: pohled do 3-složkového senzoru. Jsou zde dobře patrná 2 na sebe kolmá závaží pro osy $x - y$. Závaží pro osu z je pod nimi. Jde o model CMG-40TOBS, vyrobený firmou Güralp Systems Ltd. Převzato z Wikimedia.

2.2 Zdroje zemětřesení

Příčiny mohou být trojí: antropogenní, přírodní a tektonické. U všech však platí, že aby došlo ke vzniku seismických vln, musí se uvolnit množství nahromaděné energie. Antropogenními zdroji jsou například sesuvy v důlních dílech, odstřely jakéhokoliv druhu nebo dokonce obyčejný úder kladivem, jakého se využívá v mělké seismice. Otázkou zůstává, zda sem řadit zemětřesení vzniklá v důsledku lidmi pozměněných napěťových podmínek. Co se přírodních zdrojů týče, můžeme se setkat se zemětřesením vzniklým v důsledku rychlého uvolnění natlakovaných tekutin, jako například výbuch sopky, nebo v důsledku uvolnění napětí z horniny. Tektonická zemětřesení mají původ ve vzájemném pohybu a srážkách tektonických desek. Proto také se většina tektonických zemětřesení odehrává na hranicích litosférických desek. Tyto mají původ buďto v subdukci dvou desek, vzdalujících se deskách na riftech nebo horizontálně se pohybujících transformních zlomech (Stein a Klosko, 2002).

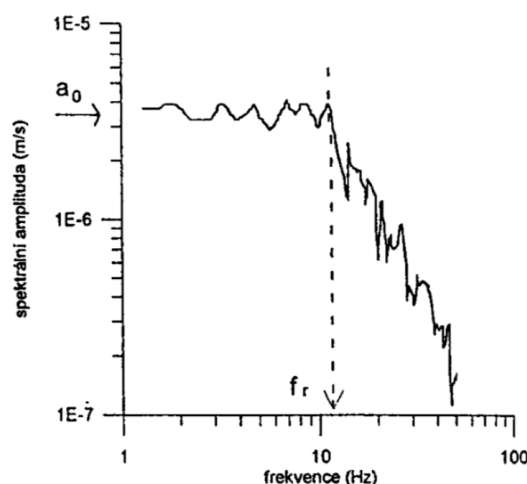


Obrázek 6: Zjednodušené znázornění deskové tektoniky. Převzato ze Stein a Klosko, 2002.

2.3 Mechanismy zemětřesení

Pokud na zlomu dochází k pohybům, může se stát, že se sousední bloky „zaklesnou“. V takovém případě vzniká riziko tektonického zemětřesení. Jak se kinetická energie pohybujících se bloků přeměňuje na potenciální energii deformace, napětí v hornině roste. Nakonec se rychle uvolní při odtrhnutí spojených částí a vznikají otřesy. K tomu dochází v momentě, kdy napětí na zlomu překročí kritickou hodnotu. Vytvoří se porušení horniny smykovou trhlinou, od které se pak šíří seismické vlny (Zahradník a Janský, 1995).

Ze záznamu zemětřesení lze s dostatečně hustou sítí měřících stanic určit orientaci samotné zlomové plochy (z orientace prvních příchozích vln - Lowrie, 2007) a odhadovat délku zlomu (z frekvenčního spektra zemětřesení - Zahradník a Janský, 1995).



Obrázek 7: Na frekvenčním spektru je vyznačena rohová frekvence f_r . Délka zlomu je potom určována vztahem $L = 1/f_r$. Převzato z Zahradník a Janský, 1995.

2.4 Přípovrchové efekty

Přímé poškození pozemních staveb otřesy není jediné riziko provázející zemětřesení. Může se vyskytnout celá řada dalších jevů, které navyšují celkové škody. Ty navíc souvisí i s lokalitou postižené oblasti. Pokud je zasažena neobydlená oblast, škody na majetku a životech budou minimální a lze očekávat pouze dopad na prostředí. Budou se vyskytovat jevy jako sesuvy půd, trhliny, ztekucení půd a jiné. Oproti tomu je-li zasažena hustě obydlená oblast, následky mohou být velmi ničivé.

Krom toho se vyskytují ještě druhotné jevy provázející zemětřesení, jako například požáry nebo záplavy, které mohou být vyvolané buďto přímo samotným zemětřesením, nebo jeho přímými průvodními jevy. Tyto druhotné jevy mohou napáchat značné škody právě v hustě obydlených oblastech. Během času se ukázalo, že ztráty na životech působí zejména padající budovy a některé druhotné jevy, jako záplava či sesuv. Oproti tomu spíše ztráty na majetku a poškození staveb působí požáry a ztekucení půd (Dobre, Dragomir a Georgescu, 2013)

3. ZEMĚTŘESENÍ – VLIV NA STAVBY

Z ekonomických a bezpečnostních důvodů je nutné napláňovat budovy pro běžné využití tak, aby po zásahu zemětřesením malé či střední intenzity byly případně poškozeny, ale nezhroutily se. Tak by nebyl nikdo ohrožen na životě, ale budovu by bylo nutné přestavět. Přístup, kdy budovy jsou plánovány tak, aby odolaly zemětřesení opakovaně nebo aby nebyl nutně přerušen provoz budovy, je méně častý. Objevuje se zejména u budov příslušných složek, které mají roli v záchranných pracech po zemětřesení, jako jsou nemocnice, hasičské stanice a krizová komunikační centra (Dobre, Dragomir a Georgescu, 2013). Projektovat všechny budovy tak, aby byly schopné odolat zemětřesení výjimečné intenzity, by bylo finančně neúnosné. A proto se to týká jen zařízení se zvláštním rizikem, jako jsou například jaderné elektrárny (Somerville a Moriwaki, 2003).

Samotné chování budovy při otřesech je dáno několika parametry, jak je popsali Dobre, Dragomir a Georgescu:

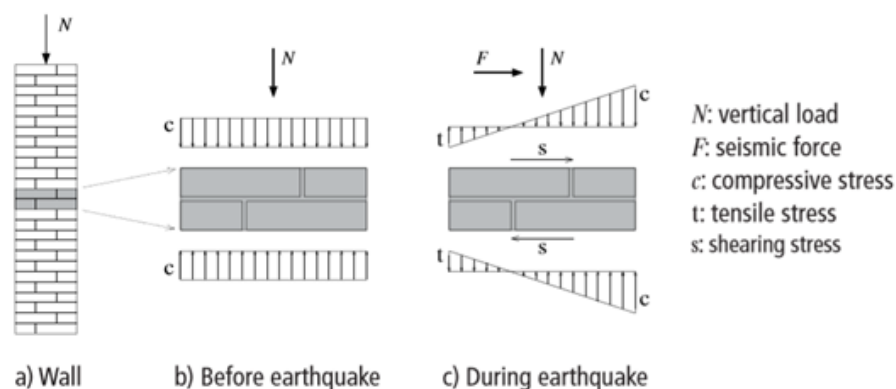
- Vlastní frekvence: pokud se vlastní frekvence budovy blíží frekvenci otřesů na povrchu, nastane oscilace a poškození stavby
- Tlumení: příčky a další prvky nepřenášející váhu budovy mohou tlumit vibrace
- Tuhost: méně tuhé prvky budovy mohou přečkat několik cyklů otřesů bez porušení. Oproti tomu křehké prvky se mohou po otřesech náhle zhroutit
- Tvárnost: použití průtažných materiálů na nosné prvky (zejména ocel) může zajistit deformaci budovy místo zhroucení
- Rozložení budovy: určuje, jakým způsobem budou seismické vlny distribuované skrz budovu. V případě budov ve tvaru písmen L, T a H roste namáhání materiálu v místech stýkajících se křídel budovy. Torzní síly se snaží „otočit“ jedno křídlo budovy okolo jiného
- Přizemí budovy: u vícepatrových budov s otevřenými prostory v přízemí, jako jsou obchody či galerie, je vertikálně nerovnoměrné rozložení tuhosti. Nosné prvky v přízemí nesou celou váhu budovy a při porušení mohou způsobit kolaps stavby

Pro navržení budovy schopné odolávat zemětřesení je nutné dodržet několik podmínek. Účinky zemětřesení na budovu jsou úměrné její hmotnosti a maximálnímu zrychlení, které je uděleno hmotě. Materiál navíc musí být odolný a schopný vratné deformace. Proto by kvalitní budova měla být co nejvíce lehká, pevná a měla mít vysokou mez elasticity.

Obvyklé materiály, se kterými se setkáváme, jsou dřevo, ocel, železo, beton, kámen, cihly či jiné moderní stavební hmoty. Dnes jsou (zejména pro rodinné domy) oblíbeným materiálem tvárnice z keramiky, pórobetonu a jiných směsí. Tyto produkty mají rozmanité tvary umožňující skládat je těsněji k sobě, některé jsou i duté, pro zlepšení tepelně izolačních vlastností. Mají poměrně nízkou hmotnost, avšak není zvykem je používat na nosné prvky u velkých budov, kde by musely přenášet velké zatížení (to platí i pro dřevo). Dřevo, jako stavební materiál, vykazuje výborné vlastnosti, jelikož je velmi pevné v porovnání ke své hmotnosti a je velmi pružné. Rovněž ocel je výborný materiál, pouze s vyšší cenou a vyšší hmotností. Železo je v porovnání s ocelí materiál výrazně horší, jelikož má mnohem nižší mez elasticity. Beton vyztužený železem či ocelí lze připravit podle potřeb konkrétní budovy a jeho velkou výhodou je, že nosná konstrukce může být zhotovena jako jediný kus. Kámen a cihly spojené obyčejnou maltou nemají vysokou pružnost. Přesněji řečeno, jejich pružnost se odvíjí od kvality spojení a velmi závisí na druhu malty. Malta bez použití cementu způsobí, že zdivo nebude mít téměř žádnou pružnost, oproti tomu malta s vysoce kvalitním cementem může zdivu poskytnout poměrně uspokojivé vlastnosti (Mohorovičić, 1911).

3.1 Vliv tvaru a konstrukce budov

Krom samotného použitého materiálu hraje v chování budovy velkou roli její tvar a rozměry, typ a umístění nosných prvků a nakonec prvky nemající nosnou funkci (Arnold, 1994). Tyto parametry rovněž určují její stabilitu. Při projektování budovy architekt spočítá rozložení napětí na zdivo a zvolí takovou variantu, která bude při daném rozpočtu nejvýhodnější. Při průchodu seismických vln se však toto rozložení napětí mění, a pokud v některých bodech snad překročí kritickou mez, materiál se poruší a zdivo praská.



Obrázek 8: Mění se rozložení napětí v segmentu cihlového zdiva během zemětřesení. Převzato z Arya, Boen a Ishiyama, 2014

Na tomto jevu se podílí i skutečnost, že při projektování budov se ne vždy zohledňuje výsledné rozložení napětí po osazení budovy vybavením a prvky nepodílejícími se na přenášení zatížení (jako například příčky, podhledy, vzduchotechnika, schodiště a další). Ty navíc výrazně mění i jiné parametry, a to zejména schopnost budovy tlumit kmity. Přitom tato skupina vybavení a nestrukturních prvků tvoří značnou část výsledné ceny budovy (Arya, Boen a Ishiyama, 2014 uvádějí, že jde až o 80% z celkové ceny), a je proto žádoucí, aby zemětřesení přečkala bez úhony.

Co se tvaru týče, optimální jsou pravidelné, symetrické budovy se stejně vysokými patry, odolné vůči torznímu namáhání. Ideálním tvarem půdorysu je proto kruh (kvůli dokonalé symetrii), ale z urbanistického hlediska je značně nepraktický. Naneštěstí symetrický tvar samotný neznamenaá dobrou seismickou odezvu. Budovy zabírající rozsáhlou plochu, nebo jen výrazně protáhlé v jednom směru (jako například průmyslové objekty), se nebudou chovat jako jediný celek. Mohou vznikat rozdíly napětí v podélném směru a rozdíly v horizontálních výchylkách. Vzdálené části budovy dokonce mohou začít kmitat s jinými fázemi (Arnold, 1994).

Nesymetrické budovy více trpí na namáhání torzí a koncentraci napětí v určitých bodech (například na sloupech nebo nosnících). Týká se to zejména budov ve tvaru písmen L, T, U, H, dále budov s nevhodně navrženým přízemím (příliš nízké či vysoké přízemní patro, nebo velké rozestupy mezi nosnými sloupy), s příliš velkými či častými otvory v nosných zdech, přerušení nosníků či nosných sloupů nebo změna jejich průměru, budovy

založené ve svahu, skořepinové konstrukce, stavby či prvky staveb zakotvené lany a mnohé další. Pro množství typů a konstrukcí nelze spoléhat pouze na stavařské tabulky a chování budov je třeba spočítat. V rizikových oblastech je doporučeno provádět modální analýzu u všech budov vyšších než 5 podlaží (Arnold, 1994).

Vhodné volbě konstrukce je třeba přizpůsobit i volbu stavebního materiálu. Základní vlastnosti obvyklých stavebních hmot byly již nastíněny výše. Samotná konstrukce může jejich přednosti a nedostatky buďto zmírnit nebo naopak ještě umocnit. Takzvané „konstrukce odolné proti účinkům zemětřesení“ (jak jsou pojmenované v – již zrušené - normě ČSN 73 0036) jsou pouze uplatněním obecných zásad o účincích otřesů na budovy do praxe. Tyto odolné konstrukce jsou lehké, a přitom dostatečně pevné. Při dodržení příslušných technických postupů lze postavit seizmicky odolnou stavbu z kterékoli obvyklé stavební hmoty, od vepřovic počínaje, přes dřevo, kámen, ocelové rámy až po předpjatý beton. U již postavených budov je možné seizmickou ochranu přidělat dodatečně. Existuje celá řada technických řešení, jak to provést (například zpevnění stěn, vhodnější výplně v ocelovém rámu, seizmická izolace, přidání dalšího rámu – vnitřního či vnějšího, přestavba, a jiné. Viz Arnold, 1994), ty zde však rozebírány nebudou.

4. ODEZVA BUDOV

4.1 Síly a zrychlení

Když zemětřesení rozpohybuje zemi okolo základů stavby, materiál budovy se snaží pohyb následovat a působí na něj setrvačné síly. Výsledný pohyb je potom dán dynamickými vlastnostmi budovy, vlastnostmi stavebních materiálů a pohybem země pod budovou. Základy budovy vzhledem k zemi považujeme za nehybné, a proto na každý bod budovy působí stejně velká vnější síla, rovná násobku hmotnosti bodu a zrychlení země (2. Newtonův zákon):

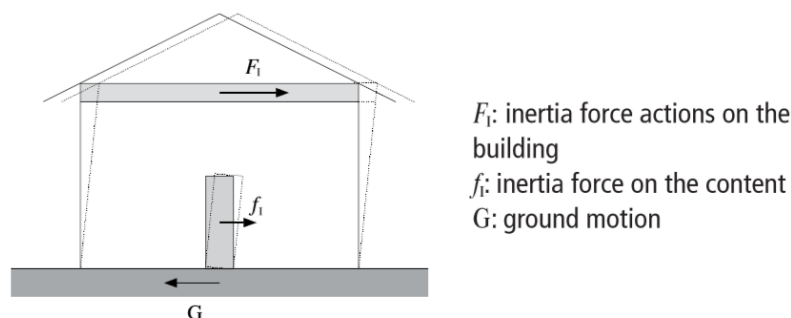
$$F = m * a$$

Proto je také pro tento případ výhodnější popisovat síly vyvolané zemětřesením pomocí zrychlení (místo výchylek či rychlostí pohybu země). Celková velikost této síly, působící na celou budovu, je pak úměrná hmotnosti této budovy (Jennings, 2003).

Na charakter kmitání budovy má vliv i typ vlnění, který jej vyvolal. P-vlna přicházející do budovy svisle vzhůru ze země vyvolává pohyby rovněž ve vertikální rovině, kdežto S-vlna v téže situaci vyvolává pohyby horizontální. Proto lze stanovit zrychlení horizontální a vertikální a z nich vypočíst velikost síly působící horizontálně a vertikálně. Hmotnost budovy, použitá ve výpočtu celkové síly, se rozdělí mezi horizontální a vertikální zrychlení v takovém poměru, jaký zaujímají vzhledem k celkovému zrychlení (Arnold, 1994).

Pro výpočet bezpečnosti budovy při zemětřesení je důležitější znát horizontálně působící síly spíše než vertikální. Svislé síly bývají většinou menší, také je proti nim konstrukce již svým návrhem na vlastní tíhu odolnější. Svislé zatížení se může uplatnit jednak v oblastech blízko epicentra, nebo protáhlých staveb, jako jsou mosty (Fischer, 2009).

Nevhodně navržené budovy utrpí poškození již při zrychlení 0,1 g. Středně velké zemětřesení může trvat několik vteřin a zrychlení může být přibližně 0,2 g. Na velmi krátké časové úseky však může přesáhnout i 1 g. Protože lidské vnímání je poměrně citlivé – je schopné zaznamenat změny zrychlení už od hodnoty 0,001 g – udržet rovnováhu je nesnadné a nečekaný otřes bývá častým zdrojem zranění. Obecně platí, že množství opakovaných změn zrychlení, rozložených do nějakého časového úseku, znamená pro budovu více poškození než jediný mohutný otřes. Trvajících otřesů poškozují strukturu budovy mikroprasklinami, což vede k poklesu tuhosti budovy a to následně vede ke snížené odolnosti vůči zemětřesení (Arnold, 1994). Pokud budou trvajících otřesů působit na zeminu, mohou dokonce způsobit ztekucení půd.



Obrázek 9: Setrvačné síly působící na stavbu. F_i = setrvačná síla působící na budovu, f_i = setrvačná síla působící na vybavení budovy, G = pohyb zemského povrchu.

Převzato z Arya, Boen a Ishiyama, 2014

4.2 Otřesy

Z naměřeného zrychlení lze integrací spočítat rychlosti pohybu země a jeho výchylky. Během zemětřesení se hodnoty zrychlení, rychlostí i výchylek značně liší ve vztahu k frekvenci seismických vln. Vysokofrekvenční vlny (více než 10 Hz) mají sklon k vysokým amplitudám zrychlení, ale malým amplitudám výchylek. U nízkofrekvenčních vln tomu bývá naopak, amplitudy zrychlení jsou nízké a amplitudy výchylek vysoké. Pro upřesnění nutno uvést, že amplituda zrychlení je pouze jeho nejvyšší dosažená hodnota a lze ji odečíst přímo z akcelerogramu bez nutnosti data jakkoliv zpracovávat. Amplituda rychlosti a amplituda výchylky se získají obdobně z vypočtených dat, ale už neobsahují tolik informací o periodičnosti pohybu země, jelikož se v průběhu integrace křivky zhlazují (Jennings, 2003).

Také se stanovuje doba trvání otřesu - je to časový úsek, kdy zrychlení překročí zvolenou prahovou hodnotu zrychlení (obvykle bráno 0,05 g). Hodnoty se liší od prvních sekund (San Fernando, 1971 – otřes trval 6 sekund) až do řádu minut (Aljaška, 1964 – přes 3 minuty). Trvání otřesu je jedna z charakteristik otřesu jako takového (Federal Emergency Management Agency, 2006). Další z charakteristik otřesu je výchylka povrchu země. Je to vzdálenost, o kterou se vychýlil bod na povrchu ze své původní polohy. Tyto vzdálenosti jsou poměrně malé – pokud nejsme příliš blízko epicentru, jedná se řádově o centimetry. Rychlost tohoto pohybu je také poměrně nízká: řádově centimetry za sekundy (FEMA, 2006).

4.3 Vlastní frekvence

Pokud kyvadlo pouze postrčíme vpřed, frekvence s jakou začne kmitat, se nazývá vlastní. Všechny objekty mají svou vlastní frekvenci. Abychom mohli kyvadlo rozkývat co nejvíce, musíme se s frekvencí kývání blížit k jeho vlastní frekvenci. Obdobně, pokud zemětřesení roztřese budovu, ta bude mít sklon kmitat na své vlastní frekvenci. A pokud otřesy budou na frekvenci blízké k vlastní frekvenci budovy, začne se projevovat rezonance a amplitudy kmitů budovy výrazně porostou, až k porušení materiálu. Během zemětřesení může dojít ke změnám vlastní frekvence kvůli tvorbě prasklin a vl. frekvence potom klesne, nebo deformaci ocelových nosných prvků, kdy vlastní frekvence může paradoxně vzrůst. Stanovení vlastní frekvence se velice často pouze odhaduje empirickými vzorci závislými na výšce. Například:

$$T = C_t H^{0,75}$$

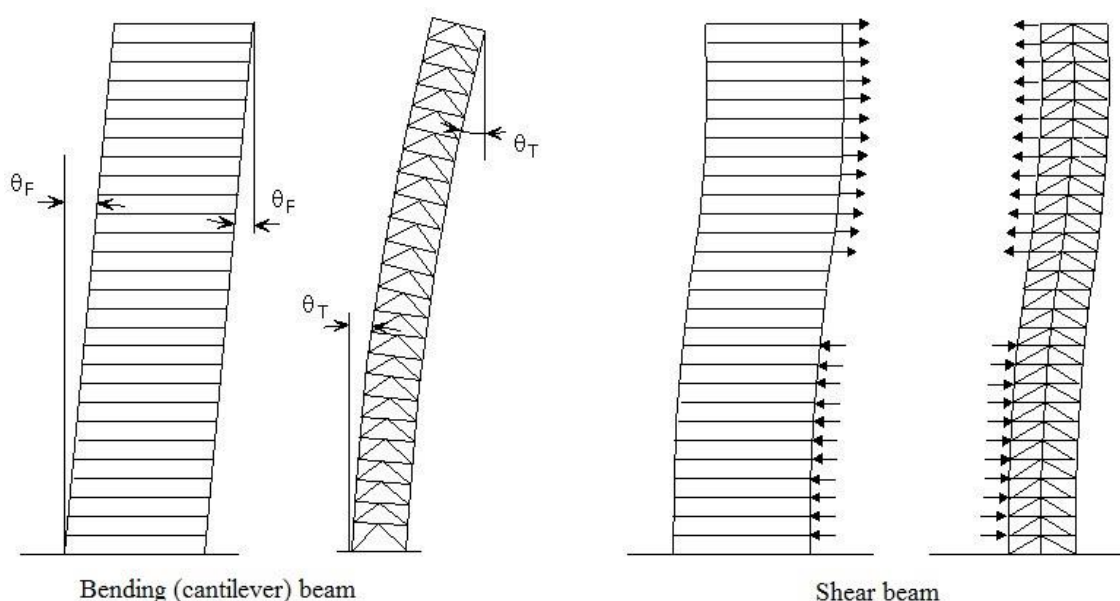
Kde T je vlastní perioda budovy (pouze převrácená hodnota frekvence) a H je výška v metrech od země. Parametr C_t je koeficient kalibrovaný pro nejlepší shodu s experimentálními daty. Pro betonové a cihlové budovy je $C_t = 0,05$, pro železobeton $0,03$ a pro MRF (moment resisting frames) je $C_t = 0,075$ (Eleftheriadou a Karabinis, 2013). Hodnoty se mohou podle různých autorů lišit. Pro Evropský region je stanovuje nyní platná Euronorma 8 (EC8).

Další dva způsoby výpočtu vlastní frekvence jsou založeny na zjednodušení typů budov na dva rozdílné modely oscilátorů: oscilátor s jedním stupněm volnosti a oscilátor s více stupni volnosti. První případ má jednoduché řešení:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$$

kde f je vlastní frekvence, m hmotnost budovy a k její tuhost.

Obdobný přístup k problematice má metoda Continuous Beam Theory. Také dělí budovy na dva typy: ty s ohebnými příčnými nosníky a tuhými stěnami, nebo budovy s tuhými příčnými nosníky a ohebnými stěnami (v originále Shear Beam a Bending Beam). Modely se liší tvarem hlavních módů kmitání, ale závislost vlastní frekvence na výšce zůstává. Pro každý mód kmitání potom může být vypočtena příslušná velikost smykové síly a rozložena podél výškového profilu budovy, pro každý mód kmitání zvlášť. Celkové síly působící na budovu v daném bodě jsou pak součtem sil jednotlivých módů v tomto bodě (Pinho a Crowley, 2009).



Obrázek 12: Rozdílné chování budov v závislosti na typu ohýbání nosníků (Continuous Beam Theory). Převzato z <http://www.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg14/11500.htm>

4.4 Spektrum odezvy

Spektrum odezvy vykresluje maximum zrychlení, rychlosti nebo výchylky proti frekvenci (nebo periodě). Přímou poskytuje informaci o maximální odezvě budovy s jedním stupněm volnosti na konkrétní pohyb země, a v kombinaci s modální analýzou umožní totéž i pro budovy s více stupni volnosti (Jennings, 2003). Co je navíc velmi důležité pro

plánování budov, zahrnuje i informaci o tlumení. Vrátime-li se k příkladu oscilátoru s jedním stupněm volnosti, matematicky můžeme jeho spektra odezvy zapsat jako:

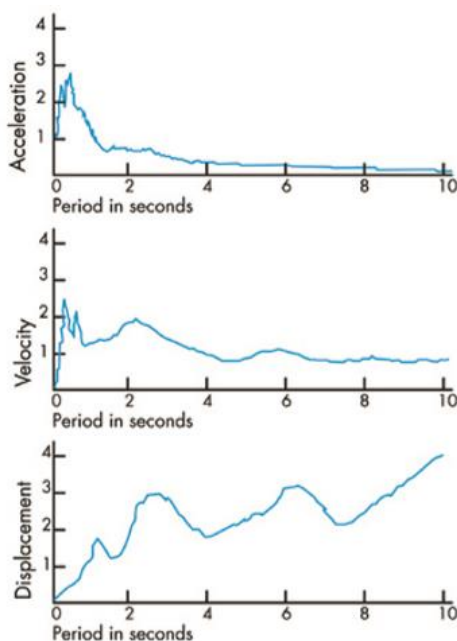
$$S_D(\omega_n, \vartheta) = \max_t |x(t)|$$

$$S_V(\omega_n, \vartheta) = \max_t |\dot{x}(t)|$$

$$S_A(\omega_n, \vartheta) = \max_t |\ddot{x}(t) + \ddot{u}_g(t)|$$

Kde S_D je spektrum výchylek, S_V spektrum rychlostí a S_A spektrum zrychlení. Člen ω_n je roven $2\pi f_n$ (a také odmocnině z k/m ; k je tuhost oscilátoru, m jeho hmotnost). ϑ vyjadřuje tlumení. $x(t)$ je výchylka oscilátoru v čase t . $\ddot{u}_g(t)$ značí zrychlení země v čase t .

Pokud tuhost k bude velmi velká, ω_n se blíží $k \rightarrow \infty$ a S_D a S_V se budou blížit 0. S_A se bude blížit $\max_t |\ddot{u}_g|$. Naopak, pokud tuhost bude zanedbatelná, oscilátor bude izolován od pohybu země ($\omega_n \rightarrow 0$). Potom $S_D \rightarrow \max_t |u_g(t)|$; $S_V \rightarrow \max_t |\dot{u}_g(t)|$ a $S_A \rightarrow 0$. Parametr tlumení ϑ lze jen těžko spočítat analyticky, ale je dobře určitelný přímo z pozorované odezvy. Parametry tuhosti K a hmotnosti M jsou zase snadno spočítatelné, ale nedají se pozorovat přímo (Jennings, 2003).



Obrázek 13: Jednoduchý příklad spekter odezvy. Ostrá maxima na křivce grafu zrychlení vs. perioda ukazují na vlastní frekvenci budovy. Převzato z FEMA, 2006.

Výpočet spektra je možno provést mnoha způsoby. Pro budovu s jedním stupněm volnosti to třeba lze provést vyřešením pohybové rovnice oscilátoru:

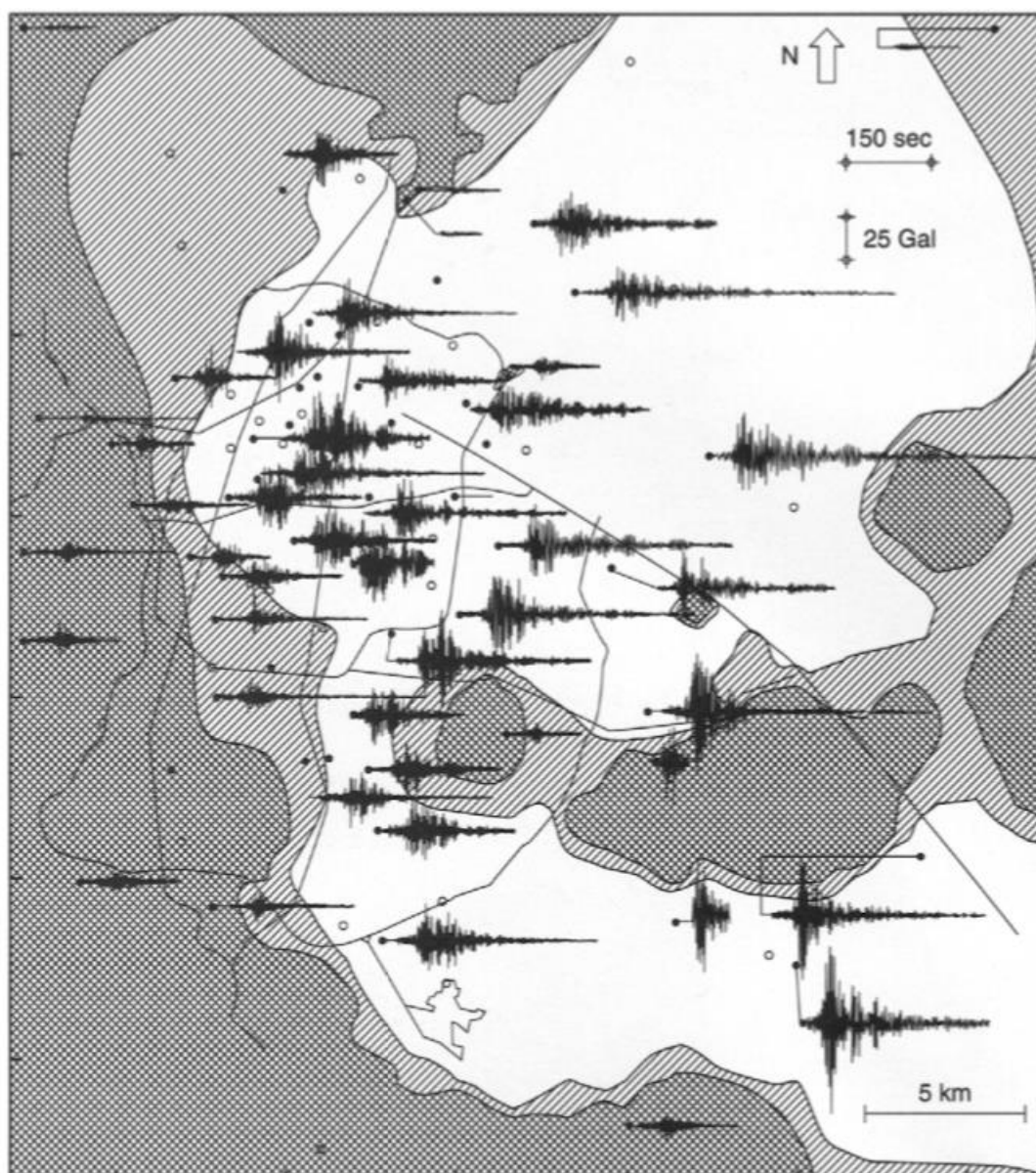
$$\ddot{x} + 2\omega_n\zeta\dot{x} + \omega_n^2x = -\ddot{u}_g(t)$$

Budovy s více stupni volnosti v počtu možných způsobů řešení však příliš nezaostávají. Můžeme uvést například metodu Ekvivalentního Oscilátoru, metodu Maximální Modální Odezvy, nebo metodu Kombinace Modálních Odezv. Každá z nich má své výhody a nevýhody, avšak jejich detailní rozbor by dalece přesáhl rozsah této práce. Více informací poskytuje Jennings, 2003.

4.5 Spektrum odezvy země

Země se řídí stejnými fyzikálními zákony jako jiné objekty, a proto můžeme vypočítat spektrum odezvy. Hodnoty vlastní frekvence se typicky pohybují mezi 0,5 až 3 Hz, v závislosti na povaze horniny (či zeminy). Tvrdé horniny a zeminy tíhnou k vibracím s krátkou periodou, kdežto měkké zeminy budou mít dlouhou periodu. Na rozdíl od budov však nejsou za běžných podmínek schopny déletrvajících pohybů (ty jsou rychle zatlumeny). Proto je také snaha na měkkých podložích projektovat nízké a tuhé budovy (FEMA, 2006).

Spektrum odezvy země může být získáno těmito způsoby: ze záznamu zemětřesení, výpočtem ze záznamu mikrootřesů nebo teoretickými výpočty (Singh, Ordaz a Pacheco, 2003). Výpočet z měřeného zemětřesení má obdobný princip jako u budov. Metoda výpočtu z mikrootřesů se zase uplatní zejména na lokalitách s nízkou seismicitou. Vypočítá se poměr Fourierových spekter amplitud horizontální (H) a vertikální (V) složky seismického šumu a vykreslí se proti frekvenci (Choobbasti, Rezaei a Farrokhzad, 2013). Poslední způsob, teoretické výpočty, se používá v případech s nedostatkem měřených dat. Ze známého seismického rizika v daném místě může být odhadnuta intenzita otřesu a lokální geologie i jeho přibližný průběh.



Obrázek 14: záznamy zemětřesení z 14. 8. 1995 v Údolí Mexika. Je zde vidět vliv geologie na otřesy země v daném místě. Převzato z Singh, Ordaz a Pacheco, 2003.

Jelikož interval obvyklých frekvencí země leží uvnitř intervalu obvyklých vlastních frekvencí budov, není nijak výjimečné, když dojde k rezonanci budovy. Proto i když pohyb země má třeba jen zrychlení 0,2 g, budova může být vystavená hodnotě přes 1g. Proto také budovy utrpí nejvíce poškození při otřesech blízkých jejich vlastní frekvenci. Příkladem z historie je zemětřesení v Mexico City z roku 1985. Otřesy pod městem dosahovaly periody kolem 2 sekund, po dobu přes 90 sekund. Po sečtení škod se ukázalo, že nejvíce poškozené budovy byly ty s 6 až 20 podlažími. Vyšší i nižší budovy byly znatelně méně

poškozeny (FEMA, 2006). Pro nízké budovy lze navíc najít v tabulkách stavebních směrnic již vypočtená zjednodušená spektra odezvy.

5. SHRNU TÍ A ZÁVĚR

S rostoucí populací lidstva vzrůstá i naléhavost chránit životy a majetek před následky zemětřesení. Ukázali jsme si, že kvalitně postavená budova s vhodně zvolenými parametry může docela dobře obstát při zemětřesení. Pokud jsou respektovány vlastnosti materiálu, může být seismicky odolná budova postavena z jakékoliv obvyklého stavebního materiálu. Další důležitý aspekt ovlivňující chování budovy je samotná lokalita, na níž stojí. Jednak se vliv geologie promítá do charakteru otřesů na povrchu, jednak hrozí následné poškození stavby přírodními jevy vyvolanými zemětřesením, a nakonec se musí zvážit vlastnosti zeminy (či horniny), tak aby nenastala rezonance s budovou. Ta nastane v případě, že je hodnota frekvence otřesů blízká vlastní frekvenci budovy.

Protože vlastnosti podloží budovy neovlivníme, musíme zvolit vlastnosti budovy tak, se minimalizovalo seismické poškození. Důležité vlastnosti jsou zejména: rozměry a výška budovy, hmotnost, tlumení a tuhost budovy.

Nejcennějším nástrojem při plánování stavby je však spektrum odezvy. Popisuje maximální hodnotu výchylky, rychlosti nebo zrychlení při dané frekvenci. Obsahuje informace o vlastních frekvencích, lze z něj spočítat smykovou sílu působící na budovu a je v něm zahrnuto i tlumení. S jeho využitím se architekt může vyhnout rizikové skupině vlastních frekvencí na dané lokalitě.

K výpočtu spekter odezvy existuje mnoho metod, od velmi přesných analytických metod až po empirické odhady. Jelikož je problematika seismické odezvy budov nedílně spjata s rozvojem v oblasti stavebnictví, lze předpokládat, že se bude dále rozvíjet a současné metody se budou dále vylepšovat.

7. CITACE A ODKAZY

ARNOLD, Christopher. *Buildings at risk: Design basics for practicing architects*. Washington, DC: AIA/ACSA Council on Architectural Research, 1994. ISBN 0-935502-08-4.

ARYA, Anand, Teddy BOEN a Yuji ISHIYAMA. *Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction*. France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2014. ISBN 978-92-3-000032-5.

DOBRE D., DRAGOMIR C. S., GEORGESCU E. S., 2013, *Earthquake effects: the impact on buildings and environment*. Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering, Vol. II, PRINT ISSN 2285-6064, 5-10.

ELEFThERIADOU, Anastasia a Athanasios KARABINIS. Correlation of Structural Seismic Damage with Fundamental Period of RC Buildings. *Open Journal of Civil Engineering*. 2013, (3): 45 - 67.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). *Designing for Earthquakes: A Manual for Architects*. Oakland: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2006. ISBN 1484117468

FISCHER, Ondřej. Nová norma pro navrhování konstrukcí odolných proti účinkům zemětřesení. *Časopis stavebnictví* [online]. 2009, 16. 3. 2009 [cit. 2015-08-08]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/nova-norma-pro-navrhovani-konstrukci-odolnych-proti-ucinkum-zemetreseni_N2126

HAVSKOV, Jens a Gerardo ALGUACIL. *Instrumentation in Earthquake Seismology*. University of Bergen, Norway, June 2002. Instituto Andaluz de Geofísica, University of Granada, Spain.

CHOOBBASTI, Asskar, Sadegh REZAEI a Farzad FARROKHZAD. Evaluation of site response characteristics using microtremors. *Grádevinar*. 2013, (65): 731-741.

INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. *Seismic Wave Behavior: Effect on Buildings*. Dostupné z:

http://www.iris.edu/hq/programs/education_and_outreach/animations/6

JENNINGS, Paul. An Introduction to the Earthquake Response of Structures. In: *International handbook of earthquake and engineering seismology: vol. 81B*. California: Academic Press, 2003, s. 1097 - 1126. ISBN 0-12-440658-0.

LOWRIE, William. *Fundamentals of Geophysics*. Second Edition. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-67596-3.

MOHOROVIČIĆ, Andrija a Vjera LOPAC (překl.). Effects of earthquakes on buildings: Lecture given by Professor Andrija Mohorovičić, Ph. D., at the Croatian Society of Engineers and Architects (CSEA) on March 1st, 1909. *Geofizika*. 2009, **26**(1): 1 - 65. ISSN 0352-3659. Dostupné také z: http://geofizika-journal.gfz.hr/vol_26/No1/26_1_mohorovicic.pdf

NOVOTNÝ, Oldřich. *Seismic Surface Waves*. Salvador: Universidae Federal da Bahia, 1999. Dostupné také z: <http://geo.mff.cuni.cz/vyuka/Novotny-SeismicSurfaceWaves-ocr.pdf>

PETRÁNEK, Jan. *Malá encyklopedie geologie*. s. 235-236. České Budějovice: JIH, 1993. ISBN 80-900351-2-4.

"Seismometer kum hg" by Hannes Grobe 19:31, 20 June 2007 (UTC), Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany - Own work. Licensed under CC BY-SA 2.5 via Wikimedia Commons - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Seismometer_kum_hg.jpg#/media/File:Seismometer_kum_hg.jpg

PINHO, Rui a Helen CROWLEY. Revisiting eurocode 8 formulae for periods of vibration and their employment in linear seismic analysis. *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop*. 2009, (1): 95 - 108. Dostupné také z: http://www.re Luis.it/CD/ReLUIS-EC8/pdf/08_EC8-ReLUIS.pdf

SHEARER, Peter. *Introduction to Seismology*. second edition. New York, USA: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-511-58010-9.

SINGH, S., M. ORDAZ a J. F. PACHECO. Advances in Seismology with Impact on Earthquake Engineering. *International handbook of earthquake and engineering seismology*. 2003, (81 B): 1081 - 1095.

SOMERVILLE, Paul a Yoshi MORIWAKI. Seismic Hazards and Risk: Assessment in Engineering Practice. In: *International handbook of earthquake and engineering seismology: vol. 81B*. California: Academic Press, 2003, s. 1065 - 1080. ISBN 0-12-440658-0.

STEIN a KLOSKO. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology: Earthquake mechanisms and plate tectonics*. Academic Press, 2002, s. 69. ISBN 978-0-12-440652-0.

STEIN, Seth a WYSESSION. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. 1. vyd. Blackwell Publishing, 2003, ISBN 0-86542-078-5.

THUKYDIDES (přeložil Václav BAHNÍK). *Dějiny Peloponéské války*. s. 33. Druhé vydání. Praha: Odeon, 1977. ISBN 01-042-77.

ZAHRADNÍK, J. a J. JANSKÝ. Zemětřesení: nepřítel i přítel. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 1995, **40**(4): 173–181. ISSN 0032-2423. Dostupné také z: <http://geo.mff.cuni.cz/popularizace/1995-Zahradnik-Pokroky.pdf>